

University of Groningen

The fire that burns without consuming

Levinsky, H.B.

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

1999

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Levinsky, H. B. (1999). *The fire that burns without consuming*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

The Fire That Burns Without Consuming.

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren.

Verbranding is het oudste technische proces. De oermens leerde het vuur temmen, en met die ongrijpbare vlammen hield hij de wilde dieren op afstand, roosterde zijn vlees, verwarmde zijn grot en bracht licht in de duisternis. Naarmate de mens het vuur beter leerde beheersen hebben wij er meer toepassingen voor gevonden. Dit nam een "explosieve" vlucht tijdens de industriële revolutie, toen wij overgingen van het gebruik van "vuur" tot het gebruik van "energie". Vandaag de dag is de beschikbaarheid van energie een bepalende factor voor de kwaliteit van het leven van elke mens op onze planeet en voor de mondiale economische activiteit. Van het bakken van brood tot de produktie van staal zijn wij afhankelijk van energie. Maar zelfs voor ons, de moderne mens, is ons energiegebruik in feite nog steeds het gebruik van vuur.

Laten wij kijken naar waar wij de verbranding in ons dagelijkse leven tegenkomen. Wij *zien* ons gebruik van de verbranding bij het koken (althans op aardgas), in de open haard, bij aanstekers en lucifers, bij de barbecue, tijdens een diner met geflambeerde gerechten bij kaarslicht, en als je toevallig in de keukengeiser kijkt. Bij de moderne CV-ketels ziet men de verbranding niet meer, maar door middel van de energierekening zijn wij ons tenminste bewust van het feit dat het brandt. Wij zijn ons ook bewust van het gebruik van de verbranding als wij in de auto, de bus en (soms) in de trein of in het vliegtuig stappen. Wat bijna helemaal uit ons zicht verdwenen is, is dat alle apparatuur die aan het elektriciteitsnet is aangesloten ook van de verbranding afhankelijk is, althans voorzover een kerncentrale er niet achter zit. Dus, in feite, elk keer dat wij het licht aanzetten is er ergens een vlam aan het werk. Wat koken betreft, gezien het aandeel van aardgas in het opwekken van elektriciteit in Nederland, al kook je elektrisch kook je toch op aardgas; maar dan zonder de voordelen er van. Uiteraard maakt de hele energie-intensieve industrie ook gebruik van de verbranding, maar dat zien de meesten van ons niet in ons dagelijkse leven. Met behulp van de verbranding heeft de moderne mens een aardig bestaan voor zichzelf weten op te bouwen. Wij hebben de verbranding zo goed in onze wereld weten te integreren, dat wij niet eens meer weten dat het er is.

En als je iets vanzelfsprekend vindt, dan denk je dat er alles over bekend is. In mijn denken is dit een gevolg van het leven in een technologisch geavanceerd tijdperk. De zegeningen van de moderne technologie, zoals de ware revolutie die door de micro-elektronica teweeg is gebracht, vloeien rechtstreeks voort uit de vorderingen in de moderne wetenschap. Wij zijn gewend geraakt dat technologie uit wetenschap volgt. Dit is niet de ontstaansgeschiedenis van de verbranding. De mens zette vuur naar zijn hand duizenden jaren voordat de moderne wetenschap überhaupt bestond. In de Griekse oudheid was vuur een van de 4 elementen waaruit alle materie bestond; de vlam was dermate ongrijpbaar dat de mens het moest vergoddelijken om het te bevatten. Met een verwijzing naar de titel van mijn oratie, werd in het oude testament zelfs het aangezicht van God als vuur uitgebeeld.

De verbranding is in wezen een microscopisch verschijnsel: tientallen vaak exotische chemische componenten nemen deel aan ettelijke honderden chemische reacties, die zich grotendeels afspelen in een gebied dat minder dan 1 mm dik is. Dit is duizend keer kleiner dan de schaal waarop wij de verbranding hebben leren beheersen. Het is dan geen wonder dat pas in deze eeuw men begonnen is met de onderliggende wetenschap van de verbranding. De waardering voor de complexiteit van de fysische en chemische processen in de vlam is slechts in de laatste 50 jaar gegroeid, en daadwerkelijk inzicht in deze complexiteit is pas in de afgelopen 30 jaar verkregen. Maar als de wetenschap zo jong is, hoor ik u vragen, hoe zijn al die verbrandingssystemen ontwikkeld dan? Het antwoord luidt: door engineering vernuft en ervaring. De technologische ontwikkeling van verbrandingssystemen, ook van de afgelopen twee honderd jaar, is nagenoeg geheel op empirische leest geschoeid.

Zelfs vandaag de dag, ondanks 30 jaar inzicht waarop wij kunnen bogen, wordt nog grotendeels empirisch ontwikkeld. Ik voer hier drie oorzaken aan voor deze kloof tussen de verbrandingswetenschap en de praktijk. Ten eerste zijn belangrijke fundamentele aspecten van de verbranding nog steeds slecht begrepen; er zijn witte plekken in onze kennis. Ten tweede staan de bestaande wetenschappelijke inzichten te ver af van de engineering praktijk om gebruikt te worden; anders gezegd, de consequenties van die inzichten voor hoe de ontwikkelaar zijn verbrandingssysteem moet construeren zijn niet duidelijk. En ten derde is de ontwikkelaar niet opgeleid om over verbrandingssystemen in termen van fundamentele processen te denken. Deze drie aspecten vormen de *raison d'être* voor de leerstoel Verbrandingstechnologie.

Als je verbrandingswetenschappers over hun werk hoort praten, het gaat altijd over die microscopische fysisch-chemische processen, is het onderwerp niet herkenbaar als iets dat te maken heeft met het beeld van de energievoorziening dat ik net geschetst heb. Daardoor lijkt de wetenschap een beetje in het luchtledige te hangen. Vanmiddag wil ik de microwereld van de wetenschap van de leerstoel plaatsen in de macrowereld van de praktijk. Vervolgens wil ik u een indruk geven van de uitdagingen die voor ons staan, en van het soort onderzoek dat in de leerstoel gedaan wordt. Daarna wil ik het wetenschappelijke deel van mijn rede afsluiten met enkele opmerkingen over het onderwijs.

Nu eerst, welke technologische uitdagingen nopen ons om de kloof tussen wetenschap en praktijk te overbruggen? Om dit duidelijk te maken, wil ik een paar woorden wijden aan de gevolgen van de toekomstige energievoorziening voor verbrandingstechnologie.

Technologie voor de volgende eeuw

In de geïndustrialiseerde landen wordt op dit moment in de enorme vraag naar energie voorzien door het verbranden van fossiele brandstoffen. Het verbruik van deze brandstoffen leidt tot de uitstoot van CO₂, en milieuschadelijke stoffen zoals NO_x, SO_x en koolwaterstoffen, die betrokken zijn bij zure neerslag en fotochemische smogvorming. Het toepassen van aardgas, de schoonste fossiele brandstof, wordt uiteindelijk beperkt door het eenvoudige feit dat de voorraden van deze energiebron uitputtelijk zijn. Dit geldt uiteraard voor alle fossiele brandstoffen; als zij verbruikt worden, ongeacht hoe langzaam, raken zij op een gegeven moment gewoon op. Als gevolg van de huidige publiciteit rondom CO₂-emissies, waarbij de noodzaak voor specifieke maatregelen vertroebeld wordt door de onzekerheid over de feitelijke invloed van menselijk handelen op ons klimaat, wordt de eindigheid van de reserves van fossiele brandstoffen uit het oog verloren. Goed huisvaderschap in het heden, en onze verantwoordelijkheid jegens toekomstige generaties, verplichten ons zo zuinig mogelijk met deze natuurlijke hulpbronnen om te gaan. Dezelfde morele plicht dwingt ons om de milieubelasting door schadelijke stoffen te minimaliseren.

Terugkomend op de energievoorziening, wordt in Nederland thans 50% van de totale primaire energiebehoefte door aardgas voorzien, waarbij 98% van de Nederlandse huishoudens aardgas gebruikt voor centrale verwarming. Zelfs met het ambitieuze doel om bij 2020 10% van de Nederlandse energievoorziening uit duurzame bronnen te betrekken zal dan nog altijd 90% van de energie door middel van de verbranding van fossiele brandstoffen opgewekt worden. Derhalve zal aardgas een belangrijke bijdrage aan de energievoorziening leveren tot ver in de volgende eeuw, al dan niet in combinatie met gasen van duurzame bronnen zoals waterstof uit wind- en zonne-energie en biogas.

Het gevolg hiervan voor de toekomst is dat aardgasverbranding een hoofdrol in de energievoorziening zal blijven spelen. Geavanceerde verbrandingssystemen voor aardgas met verbeterd rendement én lage emissies van milieuschadelijke stoffen, en waarmee rekening is gehouden met de invoering van duurzame gasen, zal een substantiële

bijdrage leveren aan energiebesparing en verminderde milieubelasting, en zal de overgang op duurzame technieken faciliteren. In dit licht bezien is één van de technologische uitdagingen voor de komende decennia het ontwikkelen van nieuwe generaties verbrandingsapparatuur.

Soms hoort men de opmerkingen dat nu duurzame technieken in opmars zijn, onderzoek naar verbrandingssystemen niet meer nodig is. Gezien de geschetste contouren van het toekomstige energielandschap, zal het duidelijk zijn dat dit standpunt op z'n best onrealistisch is.

Maar, de nodige ontwikkelingen gaan niet vanzelf. Wat waren onze eisen vanuit de maatschappij ook alweer? Het hoogste rendement én de laagste emissies van schadelijke stoffen. En wat wil de eindgebruiker zelf? Als ik mijzelf als de gemiddelde consument beschouw, wil ik best mijn steentje aan deze doelstellingen bijdragen, maar ik wil niet dat dit van het comfort ten koste gaat. Als ik kook, wil ik nog steeds mijn vlees eerst dichtschroeien en daarna laten sudderen, zonder dat ik de pan van pit tot pit hoeft te verplaatsen; dus moet die ene brander én een grote én een kleine vlam kunnen geven. Deze eis heet regelbereik. Ik wil ook dat mijn vier kinderen in bad kunnen gaan, zonder dat het de hele avond kost omdat wij steeds op warm water moeten wachten. Als het kan wil ik zelfs meer comfort. Bijvoorbeeld, ik wil dat mijn CV-ketel z'n eigen elektriciteit produceert, zodat als midden in de winter de stroom uitvalt mijn huis nog warm blijft. Vanuit de energie-intensieve industrie, wil men ook hete lucht of warmtetraling of elektriciteit hebben precies in die hoeveelheden en hoedanigheden, en op de plaats waar de bedrijfsvoering dat eist. En in de industrie is energiebesparing economische noodzaak.

Technologische uitdagingen

Deze schets van de toekomst leidt noodgedwongen tot een aantal technologische uitdagingen.

In de toekomst moet meer energiebesparing én lagere milieubelasting én tenminste behoud, maar liefst vergroting, van het gebruiksgemak. Doe dat maar eens. De empirische methode van ontwikkeling leert dat pogingen om één aspect van het gedrag van een verbrandingssysteem te verbeteren veelal leiden tot een verslechtering in de andere. Bijvoorbeeld, verlaging van de NO_x-emissie leidt vaak tot een onacceptabele verhoging van de CO-emissie (ook ongewenst) en/of tot een, eveneens onacceptabele, verslechtering van het regelbereik. De huidige generatie van verbrandingsapparatuur was ontwikkeld om het optimum tussen deze eisen te vinden, en zit al dicht tegen de grens van het haalbare. Maar hoe kunnen wij *collectieve* verbeteringen in alle aspecten van verbrandingsapparatuur realiseren? Hoe ontwerpen wij verbrandingssystemen "op maat", vanuit de eisen van de toepassing?

Wat het gebruik van duurzame gassen betreft is ook de praktijk van de verbranding weerbarstiger dan het beleidsmatige idee. Waterstof en biogas hebben simpelweg andere verbrandingseigenschappen dan aardgas; zonder aanpassingen werken goed functionerende aardgastoestellen gewoon niet met waterstof of biogas als brandstof. Ook verandert de samenstelling van biogas, en daardoor de verbrandingseigenschappen, met het soort biomassa waaruit het geproduceerd wordt. Dit leidt tot onbetrouwbaar gedrag van een verbrandingssysteem. Hoe moeten wij deze gassen zien te gebruiken? Een voor de hand liggende oplossing is aardgas met deze gassen bij te mengen; zo worden de veranderingen in verbrandingseigenschappen, veroorzaakt door de duurzame gassen, door de aanwezigheid van aardgas uitgevlakt, en wordt de voorraad van aardgas langzamer verbruikt. Maar, welke mengverhoudingen zijn toelaatbaar? Varieert dit per toepassing? Kunnen wij verbrandingstechnieken bedenken die minder gevoelig zijn voor de verbrandingseigenschappen van de brandstof?

Deze vragen vormen de technologische uitdaging voor de toekomst. Om deze uitdaging aan te kunnen gaan moeten wij de eigenschappen van de vlam zelf leren beheersen. Hiertoe moeten wij de fysische en chemische processen begrijpen, die verantwoordelijk zijn voor het gedrag van verbrandingssystemen, en moeten wij leren hoe wij die processen naar onze hand kunnen zetten. Om dit te realiseren moeten de leemtes in de relevante fundamentele kennis worden ingevuld én moeten de verkregen inzichten in praktisch bruikbare termen vertaald worden. Dit zal dan ook mijn onderzoeksagenda bepalen.

Dus besloten in de technologische uitdaging is een ander soort uitdaging: het ontrafelen van de vlam in die individuele chemische en fysische processen. Dit is het feitelijke domein van de verbrandingswetenschap.

Vlamstructuur

Zoals ik in mijn inleiding al zei is de vlam een complex wezen. Ik wil u nu een indruk geven van wat een vlam is en hoe wij vlammen onderzoeken.

Laten wij een eenvoudige aardgasvlam als voorbeeld nemen, zoals die van een kookbrander. Als u naar zo'n vlam kijkt ziet u een scherp gedefinieerd poederblauw vlammetje, omgeven door een soort vage donker blauwe waas. In dat scherpe lichtgevende vlammetje vindt de omzetting plaats van brandstof in verbrandingsprodukten. Voor methaan, de hoofdcomponent van aardgas, spelen zich in dit gebied ongeveer 300 elementaire chemische reacties af waarbij meer dan 50 verschillende chemische componenten betrokken zijn. Omdat dit gebied minder dan 1 mm dik is (hierbij moet u bedenken dat de temperatuur in deze millimeter stijgt van kamertemperatuur tot bijna 2000 graden Celsius!), zijn veel microscopische transportprocessen van belang, zoals diffusie van moleculen en geleiding van warmte. Er is eigenlijk een samenspel tussen de chemische reacties en transportprocessen: het transport van warmte en reactieve componenten uit het hete gedeelte van de vlam houdt de vlam in stand, en zonder dit transport gaat de vlam uit. Dit samenspel leidt tot de ruimtelijke structuur die wij als de vlam herkennen. Een belangrijk kenmerk van de vlam is dat deze structuur zich door de ruimte voortplant; als wij een doorzichtige buis gevuld met een brandbaar mengsel van brandstof en lucht aan één kant zouden ontsteken, zouden wij deze voortplanting kunnen waarnemen.

Als de vlamstructuur onveranderlijk was, was het leven een stuk gemakkelijker; dan waren alle vlammen hetzelfde. Als wij eentje uitvoerig konden bestuderen, dan wisten wij alles. Dit is helaas niet het geval: de vlamstructuur, met daarin de details van het verbrandingsproces, is afhankelijk van de situatie waarin het zich bevindt. Kleine wijzigingen in de plaatselijke zuurstof concentratie, bijvoorbeeld, kunnen de chemie van de verbranding radicaal veranderen. Tien procent minder zuurstof kan de plaatselijke concentratie van CO met een factor 100 verhogen, en die van NO verhogen met een factor 10. Omdat de chemie en het transport gekoppeld zijn, is de vlam dan ook zeer gevoelig voor stroming. Bijvoorbeeld, ondanks hoe woest de vlam op de kookbrander lijkt, kunt u de vlam gewoon uitblazen. Zowat elke type brander veroorzaakt een ander stromingspatroon. Ook warmteoverdracht heeft een grote invloed op de vlamstructuur. Op de middelbare school leerden wij dat veel chemische reacties van de temperatuur afhankelijk zijn; zo ook bij de verbranding. Het water in uw fluitketel kan alleen warmer worden als de hete vlamgassen koeler worden. Verlaging van de temperatuur in de vlam verlaagt de concentraties van belangrijke reactieve componenten, diezelfde componenten die van belang zijn voor de voortplanting van de vlam. Als wij teveel warmte aan de vlam onttrekken, gaat de vlam zelfs uit.

Niet toevallig zijn deze aspecten, plaatselijke zuurstofconcentratie, stromingspatroon en warmteoverdracht, samen met nog andere precies die dingen die per verbrandingssysteem verschillen, en waarmee de ontwikkelaar de verbranding probeert

te beheersen. Gezien hoe al deze processen in elkaar grijpen is het geen wonder dat empirisch onderzoek begrensd is.

Zoals ik in mijn inleiding aangaf, waren wij bij de energievoorziening begonnen, en zijn wij vanzelf bij microscopische chemische en fysische processen beland.

Welke gereedschappen moeten wij gebruiken om inzicht in de vlamstructuur te verkrijgen? Omdat de vlamstructuur bestaat uit de ruimtelijke verdelingen van de temperatuur, de concentraties van chemische componenten en stroming, moeten wij deze verdelingen meten. Alle vaste lichamen die wij in de vlam steken, zoals afzuigprobes en temperatuur voelers, zullen de tere vlamprocessen verstoren. Gezien de 1 mm dikte van het primaire reactie gebied, moeten wij ook met een zeer hoog ruimtelijk oplossend vermogen kunnen meten. Met behulp van optische meettechnieken kunnen wij aan beide eisen voldoen.

Als je dit allemaal gemeten hebt, moet je de metingen alsnog kunnen interpreteren in termen van elementaire processen. Analytische theorie kan geen inzicht geven in de details van de vlamstructuur. Hiervoor moeten wij geavanceerde numerieke modellen gebruiken, die alle fysische en chemische processen simuleren, inclusief die 300 reacties van 50 componenten; in principe *berekenen* zij de vlamstructuur. Door het bedrijven van deze modellen kunnen wij inzicht in de interne dynamiek van de vlam verkrijgen.

Terzijde wil ik hier opmerken dat wij nu kunnen begrijpen waarom inzicht in de complexiteit van het verbrandingsproces slechts in de laatste 30 jaar verkregen is: het is pas in deze periode dat er lasersystemen en grote computers beschikbaar zijn gekomen waarmee deze kennis verworven kon worden.

Er zijn echter beperkingen aan wat de huidige meettechnieken en modellen kunnen presteren. Helaas kunnen wij niet alle eigenschappen meten die wij graag zouden willen. Bijvoorbeeld, slechts de helft van de chemische componenten kunnen met behulp van optische technieken worden gedetecteerd; "detectie" betekent dat je weet dat een bepaalde component aanwezig is, maar niet hoeveel er is. Dit is eigenlijk wat je wilt weten. Van al de componenten in een methaanvlam kunnen wij misschien een kwart kwantitatief meten. Wat de modellen betreft, met een perfect model hoefden wij niet te meten. Met de grootste computers die er zijn is de eenvoudige bunsenbrander de meest complexe vlam die wij in detail kunnen modelleren; zelfs de kookbrander is een brug te ver. Een meer fundamenteel probleem is de betrouwbaarheid van de resultaten: die zijn afhankelijk van de betrouwbaarheid van de informatie waarop zij gebaseerd zijn, en op dit moment laat dit ook te wensen over. Bijvoorbeeld, van de snelheden van de 300 elementaire reacties in methaanverbranding zijn er weinig die tot beter dan een factor 2 bekend zijn.

Dit betekent dat, om inzicht in belangrijke processen te verkrijgen, wij soms genooddaakt zijn meettechnieken aan te passen dan wel te ontwikkelen, en dat wij ook de oorzaken van belangrijke tekortkomingen in de modellen actief moeten opsporen. Straks zal ik onze onderzoeksbenadering illustreren.

Leemtes in onze kennis

Bewapend met deze gereedschappen kunnen wij de leemtes in de kennis aanvallen. Maar welke leemtes moeten wij aanvallen?

Zoals ik net aangaf ziet het bouwwerk van onze kennis van de verbranding er uit als een gatenkaas. Er zijn grote gaten op alle niveaus. Op het meest fundamentele niveau zijn er nog steeds onbekende elementaire reacties; bijvoorbeeld, 10 jaar geleden waren er slechts 2 mechanismen voor NO-vorming in aardgasvlammen, vandaag zijn dat er 4. Naast veel van dit soort leemtes op het niveau van de kleinste details, ontbreekt er nog

een heel abstractieniveau dat nodig is om praktische ontwikkelingen te ondersteunen. Uit fundamenteel onderzoek weten wij dat het verloop van de chemische processen in de vlam door stroming en warmteoverdracht beïnvloed wordt, maar wij weten niet in welke mate, en veelal zelfs niet eens hoe, de chemie beïnvloed wordt. Een belangrijk voorbeeld hiervan is de invloed van stroming op de chemie. Deze wisselwerking is verantwoordelijk voor het regelbereik van branders; boven een bepaalde uittredesnelheid van gas uit een brander kan de vlam afblazen. Bij de eenvoudige bunsenbrander kunnen wij dit proces zelfs simuleren, maar wij kunnen nog steeds de aard van de wisselwerking niet afdoende omschrijven. Daardoor kunnen wij de ontwikkelaar van kookbranders niet uitleggen waarom zijn brander zich op een bepaalde manier gedraagt en ook niet hoe hij zijn regelbereik op basis van inzicht kan vergroten.

Binnen de leerstoel Verbrandingstechnologie formuleren wij onze onderzoeksthema's voornamelijk vanuit dit tweede abstractieniveau. Wij kijken in eerste instantie niet naar welke reacties voor verbetering vatbaar zijn, maar focussen op de ontbrekende kennis nodig om het gedrag van praktische systemen te begrijpen en beheersen. Dit omvat bijna alle wisselwerkingen tussen vlam en omgeving die een praktische toepassing karakteriseren.

Hier noem ik de thema's die ons in de leerstoel bezig houden:

- de koppeling tussen stroming en chemie. Die heb ik net genoemd. Deze wisselwerking neemt een bijzondere plaats in, omdat de kunst van branderontwerp één grote poging is om de vlam te beheersen door middel van stroming. De stroming bepaalt de menging met lucht en/of verbrandingsprodukten tijdens de verbranding, en beïnvloedt daardoor alle chemische processen.
- de wisselwerking tussen vlam en oppervlakken. Dit is een essentieel onderdeel van het proces van het benutten van de energie van de verbranding. Veel warmteoverdracht vanuit de vlam vindt plaats door direct contact tussen de reactieve vlamgassen en een vast oppervlak. Denk hierbij aan de fluitketel op uw kookbrander. Grof gezegd, hoe effectiever de warmteoverdracht hoe beter het rendement. In toekomstige apparatuur zullen vlam en te verwarmen oppervlak steeds nauwer met elkaar in contact komen, en wordt de koppeling tussen warmteoverdracht en chemie belangrijker.
- de invloed van procescondities op de vorming van milieuschadelijke stoffen. Wij weten veel over de chemische vormingsmechanismen van schadelijke stoffen, maar heel weinig over hoe deze mechanismen onder de verschillende condities van stroming, menging en warmteoverdracht in de praktijk zich manifesteren.
- zogenaamde instationaire verschijnselen, dat wil zeggen verschijnselen die in de tijd variëren. Een belangrijk voorbeeld hiervan is ontsteking: geen ontsteking, geen verbranding. Men begint met een brandstof-luchtmengsel, voegt energie toe, en een tijdje daarna is er een vlam. Denk hierbij aan hoe men de kookbrander aansteekt. Nieuwe verbrandingsprincipes opereren onder condities waarvoor de huidige kennis ontoereikend is.
- als het laatste thema wil ik een praktisch aspect aanstippen dat dwars door alle andere onderwerpen heen loopt, namelijk brandstofsamenstelling. Zoals ik eerder gememoreerd heb, hebben aardgas, waterstof, biogas, kolengas, enzovoorts allemaal andere verbrandingseigenschappen die grote gevolgen hebben voor elk van de net genoemde thema's.

Interessant is dat al deze thema's kunnen worden samengevat als de interactie tussen een complex chemisch systeem met zijn omgeving. In het verleden ging men er van uit dat de verbranding door de stroming overheerst wordt, en dat de chemie de stroming

gewoon volgde. Nu blijkt dat de details van dit chemische systeem een bepalende factor zijn in het gedrag van verbrandingsapparatuur. In de leerstoel zullen deze chemische aspecten dan ook veel aandacht krijgen.

Zo belangrijk als deze thema's zijn, zijn zij ook heel divers. Wij moeten ook niet vergeten dat zodra men één van deze thema's begint te onderzoeken, men gelijk al die leemtes in de kennis van de details van de verbranding tegenkomt. Door de breedte en de diepte van het onderwerp is het onmogelijk voor een enkele onderzoeksgroep zelfs één van deze thema's volledig te omsluiten. Daardoor wordt er veel formeel en informeel samengewerkt in de verbrandingsgemeenschap, men heeft elkaar gewoon nodig.

Ondanks deze diversiteit zullen wij in de leerstoel onderzoek op elk van deze thema's verrichten. Wij hebben een experimentele onderzoeksbenadering gekozen waarbij wij per reeks experimenten telkens één stukje van de fundamentele puzzel invullen en nieuw licht op het gedrag van praktische systemen werpen. Na verloop van tijd en met het vinden van steeds meer stukjes, zie je een beeld ontstaan waarmee de praktijk anders over verbrandingssystemen gaat denken.

Het gewone werk

Als een voorbeeld van deze benadering, alsmede om vrienden en niet-technische collega's een indruk te geven van wat voor werk wij eigenlijk doen, wil ik even iets vertellen over ons onderzoek aan de vorming van stikstofoxiden in bunsenvlammen.

De bunsenvlam, zoals wij die allemaal van de middelbare school kennen, is een goed modelsysteem voor veel huishoudelijke gastoestellen, zoals geisers, oudere CV-ketels, en onze oude vriend de kookbrander. Als u de bunsenvlam niet meer voor de geest kunt halen, neem een van die kleine vlammetjes van de kookbrander en zet 'em rechtop. Kenmerkend voor dit type vlam is dat het een soort tweetraps raket is. Het mengsel van gas en lucht dat uit de brander komt en in dat scherp omliggende vlammetje wordt verbrand heeft onvoldoende zuurstof om het aardgas volledig in kooldioxyde en waterdamp om te zetten. Er blijft wat koolmonoxyde en waterstof over, die vervolgens met zuurstof uit de omgevingslucht volledig worden verbrand. Dit gebeurt in het zichtbare blauwe waas. Dit type vlam heeft heel mooie eigenschappen, onder andere in termen van regelbereik; het enige nadeel is dat er teveel NO_x gevormd wordt. De vraag vanuit de praktijk was (en is) heel simpel: hoe kunnen wij deze vlam aan de toekomstige emissie-eisen laten voldoen?

Maar om te weten hoe je de NO_x -vorming kunt beïnvloeden, moet je weten welke van de 4 mechanismen verantwoordelijk zijn. Hiertoe moet je weten waar in de vlam NO gevormd wordt, bijvoorbeeld alleen in de plaatsen met een zeer hoge temperatuur, of ook elders. En om te weten waar in de vlam NO gevormd wordt, moet je de verdeling van NO in de vlam meten. Hoe doe je dat? Zoals ik eerder aangaf, met behulp van optische meettechnieken. De meettechniek die wij hiervoor gebruiken heet laser geïnduceerde fluorescentie. Met behulp van deze techniek is het detecteren van NO makkelijk, maar het kwantitatief meten is moeilijk. Eenvoudig gezegd laat men een laser bundel door de vlam heen gaan, waar de kleur van de bundel precies is afgesteld om door NO geabsorbeerd te worden. Na een tijdje zenden de NO -moleculen weer licht uit, in de vorm van fluorescentie, en je meet deze hoeveelheid licht met een detector. Het simpele gedachte is dat de concentratie van NO evenredig is met de hoeveelheid licht die uitgezonden wordt. Dit is zo, maar de relatie tussen lichtintensiteit en concentratie is ook afhankelijk van allerlei andere condities in de vlam, met name de plaatselijke temperatuur. Dus, om de verdeling van de NO -concentratie te kunnen meten, moet je ook de verdeling van de temperatuur meten. Dit moest je sowieso doen, want de temperatuur is een van parameters die de NO -vorming beïnvloeden. Dit doen wij met weer een andere optische techniek, afgekort CARS geheten, waarmee wij de temperatuur in de vlam nauwkeurig kunnen meten. Tevens moet je een procedure

bedenken waarmee je de NO-metingen kunt ijken, anders ben je toch onzin aan het meten.

Om de ruimtelijke verdeling van NO en temperatuur in één vlam in ons lab te meten kost ongeveer anderhalf uur tijd (inclusief ijking). Het bedenken en betrouwbaar krijgen van de ijkmeting had wel 6 maanden gekost, en het betrouwbaar leren meten van de temperatuur een paar jaar, maar als dat eenmaal achter de rug is zijn de feitelijke metingen best snel.

Terugkomend op de bunsenvlam, zal ik u de wetenschappelijke details van het onderzoek besparen, maar het resultaat is dat ongeveer de helft van het NO gevormd wordt in elk van de twee trappen. Interessant voor de ontwikkelaar is dat de hoeveelheid NO die in de tweede trap gevormd wordt betrekkelijk makkelijk te beïnvloeden is, maar dat die uit de eerste trap zeer moeilijk te verlagen is. Dit verschil in gedrag komt doordat twee verschillende mechanismen actief zijn in de twee trappen. Om het NO in de eerste trap wezenlijk te verlagen moeten de verbrandingscondities zoveel veranderd worden dat deze vlam van al haar gunstige eigenschappen wordt ontdaan. De hoeveelheid uit de eerste trap vormt dus een ondergrens, als het ware, van de NO_x-emissie voor dit type vlam; op z'n best kunnen wij de NO_x-emissie van deze vlam halveren. Het praktische probleem is dat de toekomstige emissie-eisen strenger zijn dan wat met deze vlammen haalbaar is. Dus, als een dergelijke limiet werkelijkheid wordt, zal dit type brander op den duur naar het museum verdwijnen.

Toen ik deze conclusie trok werd ik verdrietig, omdat deze constructie zo flexibel en eenvoudig is. Echter, als de ontwikkelaars van gasapparatuur dat nu weten, hoeven zij geen onnodig onderzoek te doen om te proberen deze vlammen aan de eisen te laten voldoen. Dus al is het zielig voor de brander, is het een grote stap voorwaarts in de efficiëntie waarmee de ontwikkelaar kan werken. Een beetje achter het oor krabben leert dat onze kennis van de NO-vorming in de eerste trap van de bunsenvlam eigenlijk generiek is. Dit betekent dat ook de ontwikkelaars van grootschalige apparatuur, zoals in de procesindustrie, bij voorbaat weten dat het verbranden met een tekort aan zuurstof meer NO_x zal opleveren dan zij denken. De nieuwe uitdaging aan ons en aan de ontwikkelaar is om condities te vinden waarin lage NO_x-emissies wél verkregen kunnen worden, en die te vertalen in apparatuur met dezelfde gunstige eigenschappen als de bunsenvlam had.

Ik heb nu breeduit verteld over de praktische consequenties van dit onderzoek, maar nog niet over de meer fundamentele aspecten. Vóór onze metingen waren er nagenoeg geen metingen onder zuurstofarme condities, en geen kwantitatief inzicht in de relatie tussen de structuur van de bunsenvlam en NO-vorming. Wij hebben een aantal van onze vlammen gesimuleerd met de betrouwbaarste modellen die op dit moment voorhanden zijn; hieruit blijkt dat voor vlammen met zuurstoftekort er grote discrepanties zijn tussen de berekeningen en de metingen. Vervolgonderzoek in onze groep focust op het opsporen van de tekortkoming in het chemische mechanisme van NO-vorming onder deze condities.

Relatie met de industrie

Ik heb nu genoeg verteld over het onderzoek, en wil het inhoudelijke deel van mijn rede afsluiten met een paar woorden over kennisoverdracht. Voor disciplines met een sterk engineering karakter, zoals verbrandingstechnologie, kunnen wij de beste wetenschap ter wereld bedrijven, maar als de verkregen inzichten niet in de hoofden belanden van degenen die technologie ontwikkelen, doe wij iets verkeerd. In mijn inleiding heb ik drie redenen aangegeven voor de kloof tussen wetenschap en praktijk in de verbrandingstechnologie. Over de eerste reden, leemtes in kennis, heb ik lang gesproken.

De tweede reden was onbekende consequenties van wetenschappelijke inzichten voor praktische toepassingen. Mijn verhaal van zonet over NO-vorming in bunsenvlammen is een voorbeeld van hoe deze inzichten in praktische termen vertaald kunnen worden. Deze vertaling is niet mogelijk zonder een nauwe samenwerking met de mensen die technologie ontwikkelen. Het is alleen door persoonlijke contacten dat wij de praktijk leren kennen, en alleen door deze contacten kunnen wij bruikbare kennis overdragen. Wat dat betreft schept de nabijheid van Gasunie Research en onze universiteit, en de mogelijkheden om van elkaars faciliteiten gebruik te maken, ideale condities om dit te verwezenlijken.

De derde reden betrof het feit dat de gemiddelde ontwikkelaar niet opgeleid is om verbrandingssystemen in termen van fundamentele processen te analyseren. Op kleine schaal groeien de industriële gesprekspartners in de finesses van de verbranding naar gelang de tijd men samenwerkt. Als ontwikkelaars de fundamentele inzichten onder elkaar gaan gebruiken, diffundeert deze manier van denken door de ontwikkelingsgemeenschap. Ook op kleine schaal kun je de fundamentele kennis van onderzoekers en ontwikkelaars vergroten door het geven van onderwijs; in dit verband ben ik blij om te kunnen melden dat van de 21 deelnemers aan onze keuzecollege over verbranding van afgelopen voorjaar, er 7 van Gasunie Research afkomstig waren. Gezien de toenemende samenwerking tussen Universiteiten en Hogescholen, zouden ook colleges voor HBO-ingenieurs, bijvoorbeeld in de richting Energietechniek te overwegen zijn. Natuurlijk, onze eigen promovendi en afstudeerders nemen hun kennis mee als zij de industrie ingaan; zij kunnen hun omgeving dan opleiden. Samen kunnen al deze beetjes wezenlijk bijdragen aan het dichten van de kloof in opleiding.

Dit zijn allemaal zaken van de lange adem, maar met de combinatie van onderzoek, samenwerking en onderwijs zullen toekomstige verbrandingssystemen ook uit fundamentele kennis voortkomen, net als andere moderne technologie. De energiewereld staat op de drempel van een nieuw millennium, waarin het technologische landschap de potentie heeft om radicaal te veranderen, in het voordeel van iedereen. Bij deze doe ik een beroep op al mijn collega's, zowel binnen het vakgebied als daarbuiten om samen met mij de grote uitdagingen die hierachter schuilen te zoeken, en samen te werken om de wetenschappelijke en technische barrières voor deze nieuwe ontwikkelingen te slechten.

Onderwijs

Nu wil ik graag een paar opmerkingen maken over onderwijs in een wat bredere context.

Al breng ik slechts 30% van mijn tijd als hoogleraar door is de turbulentie in het universitaire onderwijs mij niet ontgaan: de MUB, de onderwijsvernieuwing en het dalende aantal studenten die de harde bèta-studies willen volgen. Wat dit laatste betreft ben ik als scheikundige opgeleid, en ik vind het de mooiste studie die d'r is. Ik heb ook allerlei beschouwingen gelezen over hoe scheikunde niet "sexy" is, wat dat ook mag betekenen, en daarom kiezen studenten het niet. Volgens mij was scheikunde nooit sexy, en economie of rechten ook niet, trouwens, maar in mijn herinnering was 20 jaar geleden de chemische industrie meer zichtbaar als gewone industrie; men wist dat het er was, en dat je er een interessante loopbaan in kon hebben. De technologisch gerelateerde onderwerpen die iedereen tegenwoordig op de televisie ziet, nu ons primaire venster op de wereld, zijn computers, GSM's en milieu. De oliebusiness, mijns inziens nog steeds technologisch, is voor onze kinderen slechts een beursnotering, en daardoor economie, geworden. In deze zienswijze is het geen wonder dat het onderwijs in ICT en milieu het goed doen. Ik heb ook inmiddels begrepen dat veel studenten die biologie studeren de milieukant op willen. Als ik aan milieu in de breedste zin denk, vind ik veel aspecten, zoals luchtvervuiling, bodemverontreiniging en dergelijke, intrinsieke chemische onderwerpen. Nu dat CO₂ vanuit milieuoptiek ook een ongewenste stof geworden is, is energiebesparing ook milieu geworden, en ik heb net drie kwartier staan

uitleggen dat energie ook intrinsiek een chemische aangelegenheid is. Als wij binnen scheikunde maatschappij-gerichte studieprofielen gaan inrichten, wil ik hierbij een lans breken voor een profiel over energie en milieu. Gezien het niveau van het docentencorps binnen scheikunde moeten wij, ook samen met onze collega's in milieukunde, een uitstekende opleiding kunnen verzorgen waarbij onze studenten hun solide kennis van de verzamelde chemische disciplines in dienst van de maatschappij kunnen toepassen. Dit soort profiel lijkt mij een gouden kans om de rol van scheikunde in onze samenleving weer voor het voetlicht te brengen.

Ook wil ik vanuit deze plaats enkele woorden aan het promoveren wijden. Iedereen heeft moeite om aio's te krijgen, en er wordt wel gesteld dat de salarissen te laag zijn. Daar zit enige waarheid in, maar het lijkt alsof de traditie van promoveren in Nederland gedurende de laatste 15 jaar gewoon verdwenen is. Als ik luister naar wat om mij heen gezegd wordt, maak ik mij zorgen over het imago van het promoveren. Studenten zeggen dat promoveren voor vakidioten of studiebollen is, of voor "onderzoekers" waarbij de toon laat weten dat dit niet onverdeeld positief bedoeld is. Bij de industrie, en zelfs ook onder het universitaire docentencorps, hoor ik dat door het promoveren men een enge specialist wordt. Zelf kan ik geen van deze opmerkingen plaatsen. Om een deel van een brief uit het tijdschrift Science vrij te vertalen¹, wordt tijdens het promotieonderzoek de oorspronkelijk jonge student een meer volwassen en onafhankelijke geest, met verscherpte analytische vaardigheden, en iemand die eigenhandig tegenslagen heeft weten te overwinnen door creativiteit en vernuft. Ongeacht de specifieke vakinhoudelijke expertise, zijn dit eigenschappen die alle succesvolle mensen bezitten, of ze nou binnen de universiteit verkeren of in de maatschappij in het algemeen. Wie zou deze eigenschappen niet willen ontwikkelen? Bij deze doe ik een oproep aan mijn collegae professores om er voor te waken dat onze promovendi niet tot enge specialisten verworden, en oog te blijven hebben voor deze zeer maatschappelijk relevante kwaliteiten, en tevens aan mijn collega's in industrie om ook naar jonge doctoren met andere ogen te kijken. Wie weet, misschien kunnen wij een traditie in eer herstellen.

Dankwoord

Mijnheer de Rector, dames en heren, ik wil nu mijn oratie afronden met enkele dankwoorden.

Allereerst aan het College van Bestuur en de directie van de N.V. Nederlandse Gasunie voor de vooruitziende blik dat geleid heeft tot het creëren van deze leerstoel. Ook aan het College van Bestuur, het College van Decanen, het Bestuur van de Faculteit Wiskunde en Natuurwetenschappen, en de benoemingsadviescommissie voor mijn benoeming, en daarmee het in mij gestelde vertrouwen.

Ik wil ook veel van mij naaste collega's bij Gasunie bedanken voor het als klankbord dienen gedurende de afgelopen 15 jaar. In het bijzonder mijn dank aan Pierre Bartholomeus en (oud-chef) Jan Doelman, die aan de wieg van dit onderzoek hebben gestaan, en elk op zijn eigen manier mij stimuleerde om dit op te bouwen. Ook wil ik alle collega's danken die in de loop der jaren met mij aan het verbrandingsonderzoek hebben samengewerkt: Dirk van Oostendorp, Wim Borghols, Tineke van der Meij, Rob Jacobs, Randall Pieters, Tolja Mokhov, Bert Hoven, Harmen de Vries en Lamberto Eldering.

Voor bijna 2 jaar Herculeesarbeid bij het voorbereiden en opzetten van de leerstoel wil ik mijn Gasunie collega's Klaas Beukema en Wim van Gemert en RuG collega's Ton Beenackers en Theo Jurriëns mijn dank betuigen. Het enthousiasme waarmee jullie samengewerkt hebben heeft de zwaarte van de inspanning aanzienlijk verlicht. Een speciale dank ben ik aan Wim van Gemert verschuldigd voor het optreden als immers

¹ T.J. Murphy, Science 282 (1998) 1643.

opgewekte strijdmaker en raadgever, en voor het werpen van een kritische blik op deze oratie.

Aan Douwe Wiersma ben ik een bijzondere dank verschuldigd voor mijn aanwezigheid in Nederland; als hij het perspectief van zoveel boeiend onderzoek mij niet had voorgehouden, was ik 18 jaar geleden niet als postdoc naar Nederland gekomen, en stond ik hier nu niet.

Een zeer speciale dank is aan Tolja Mokhov verschuldigd. Sinds jouw komst uit de voormalige Sovjet Unie 8 jaar geleden heeft ons onderzoek een heel andere invulling gekregen, en de degelijkheid van ons werk draagt sterk jouw stempel. Ik kan mij alleen gelukkig prijzen dat de leerstoel jou als hoofddocent heeft, en verheug mij op het beleven van nieuwe avonturen in ons onderzoek.

Een laatste bijzondere woord van dank is voor mijn vrouw Alies. Een collega heeft mij ooit gevraagd met wie ik getrouwd was, mijn werk of Alies. Na enige nadenken moest het antwoord zijn: beide. Bedankt Alies voor jouw begrip voor mijn andere liefde, ondanks het feit dat zij veel van mijn tijd vraagt, dat anders voor jou en onze kinderen, Johanne, David, Daniël en Joshua, zou zijn.

Ik heb gezegd.